

АСИММЕТРИЧНЫЕ МНОГОСЛОЙНЫЕ ПЛЕНОЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ МАГНИТНОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

В данной работе исследуются особенности магнитного импеданса плёночных многослойных элементов в форме полос типа $[Ti/FeNi]_5/Ti/Cu/Ti/(FeNi/Ti)_x$, $x = 0...5$, полученных магнетронным распылением. На полученных структурах наблюдался сходный тип перемагничивания в массиве слоев между подложкой и центральным проводящим слоем меди для всех образцов и смена типа перемагничивания в массиве над проводящим слоем меди при уменьшении количества верхних магнитных слоев. Несмотря на то, что абсолютный максимум МИ соотношения импеданса составил $\Delta Z/Z = 126\%$ для симметричной структуры, асимметричная структура с 4 магнитными слоями над слоем меди также обладает высоким МИ соотношением $\Delta Z/Z = 121\%$ в меньших полях, что позволяет рекомендовать асимметричную структуру для последующей функционализации верхнего слоя в детекторах слабых магнитных полей.

Ключевые слова: многослойные пленки, гигантский магнитный импеданс, детектор слабых магнитных полей.

A. A. Chlenova, G. V. Kurlyandskaya, S. O. Volchkov, A. V. Svalov

ASYMMETRIC MULTILAYERS ELEMENTS FOR MAGNETIC DETECTION

In this paper, we study a magnetic impedance characteristics of film multilayer elements of the strip type $[Ti / FeNi] 5 / Ti / Cu / Ti / (FeNi / Ti) x$, $x = 0...5$, prepared by magnetron sputtering. We observed in these structures similar type of magnetization reversal in an array of layers between the substrate and the central conductive layer of copper for all the samples and changing the type of magnetization reversal in the array of the conductive layer of copper with a decrease in the number of upper magnetic layers. Despite the fact that the absolute maximum MI ratio amounted impedance $\Delta Z / Z = 126\%$ for a symmetrical structure, an asymmetrical structure with four magnetic layers above the layer of copper also has high MI ratio $\Delta Z / Z = 121\%$ in the lower fields, which allows to recommend asymmetric structure for the subsequent functionalization of the upper layer in detectors of weak magnetic fields.

Keywords: multilayer films, giant magnetic impedance, detection of weak magnetic fields.

Развитие методов неразрушающего контроля диктуется как необходимостью технических производств, усовершенствования технических средств управления, так и новыми требованиями к медицинскому оборудованию, при задаче получения максимально возможной чувствительности и высокой достоверности результатов детектирования. На данный момент существует широкий спектр детекторов магнитных полей, которые в разных качествах могут быть использованы в выше описанных системах. Магнитный импеданс (МИ) – это изменение комплексного сопротивления ферромагнитного проводника при изменении магнитного поля [1–2]. Данный эффект на пленочных образцах может достигать 600 % и обладает очень высокой чувствительностью, потому является перспективным кандидатом для использования, например, в магнитном биодетектировании [2].

В настоящей работе в качестве МИ сенсоров используются многослойные пленочные структуры с чередованием ферромагнитных ($\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}$) и слабомангнитных слоев (Cu , Ti), в форме структур с незамкнутым магнитным потоком [3–4]. Стандартным представителем такой структуры является образец S1, схема многослойной структуры которого представлена на рис. 1. Несмотря на то, что теоретические модели МИ для пленочных образцов, как с замкнутым, так и с незамкнутым магнитным потоком [5] рассматривают симметричные относительно высокопроводящего токовода магнитные слои с одинаковыми свойствами, экспериментально полученные образцы изначально асимметричны, так как имеется очевидное различие в характеристиках между слоем, напыляемым на стеклянную подложку и слоем, напыляемым на центральный проводящий слой меди.

Поэтому представляется интересным исследовать не только геометрически симметричные МИ структуры с одинаковой геометрией многослойной структуры над и под высокопроводящим тоководом, но и асимметричные структуры. Кроме того, асимметричную структуру можно «превращать» в симметричную, используя в качестве верхнего слоя, например, композиты на основе полимеров с наночастицами или феррогели. Подобные

конфигурации представляют особый интерес в случае магнитного детектирования с использованием магнитных маркеров, суммарные поля рассеяния которых изменяют величину импеданса чувствительного элемента.

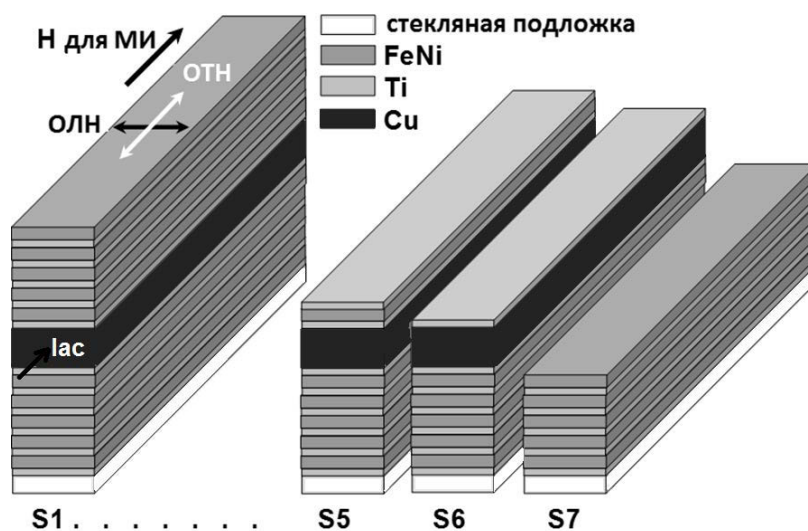


Рис. 1. Схематичное изображение исследуемых структур, где S1 – симметричная структура, с S2 по S7 – ассиметричные структуры

В данной работе исследуются особенности магнитного импеданса плёночных многослойных элементов в форме полос типа $[\text{Ti}(6\text{нм})/\text{FeNi}(100\text{нм})]_5/\text{Ti}(6\text{нм})/\text{Cu}(500\text{нм})/\text{Ti}(6\text{нм})/([\text{FeNi}(100\text{нм})]/\text{Ti}(6\text{нм}))_x$, где S1 – $x = 5$, S2 – $x = 4$, S3 – $x = 3$, S4 – $x = 2$, S5 – $x = 1$, S6 – $[\text{Ti}/\text{FeNi}]_5\text{Ti}/\text{Cu}/\text{Ti}$, S7 – $[\text{Ti}/\text{FeNi}]_5\text{Ti}$ (см. рис. 1), при варьировании толщины верхних магнитных слоев. Пленки были приготовлены методом магнетронного распыления при помощи масок на стеклянных пластинах, во внешнем магнитном поле 250 Э, при давлении остаточных газов в рабочей камере – 10^{-6} мм рт.ст. и давлении аргона – 10^{-3} мм рт.ст. Магнитные измерения включали в себя получение петель гистерезиса на магнитооптическом Керр-микроскопе и измерение магнитоимпедансных характеристик пленочных образцов на импедансном анализаторе Agilent HP E 4991 A. Для наблюдения магнитной доменной структуры с использованием меридионального эффекта Керра была использована установка, созданная на основе поляризационного микроскопа CarlZeiss высокого разрешения с линейными размерами области наблюдения 0,1–5 мм.

На полученных изображениях для всех структур, измеренных со стороны стекла, наблюдался сходный тип процессов намагничивания, а именно, перемагничивание происходило путем зарождения и смещения доменных стенок (см. рис. 2, а). В целом, можно сделать вывод, что все рассмотренные пленочные структуры обладают одноосной наведенной магнитной анизотропией с осью легкого намагничивания, параллельной короткой стороне прямоугольного элемента. Все структуры являются магнитомягкими, со средним значением коэрцитивной силы 0,5 Э и полем анизотропии порядка 3,5 Э (см. рис. 2, б).

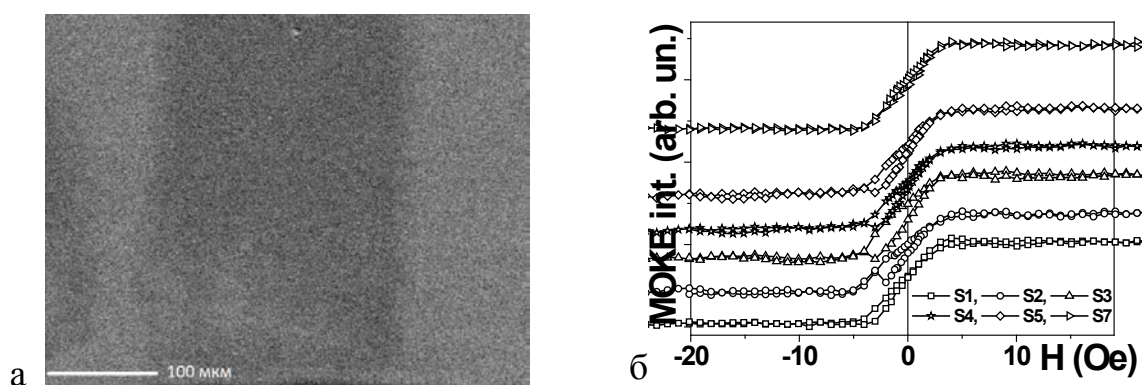


Рис. 2. Данные магнитооптического Керр-микроскопа: (а) изображение для структуры S1 со стороны стекла ($H = 1,4$ Э), ось легкого намагничивания расположена в плоскости пленочной структуры (вертикально); (б) петли гистерезиса для всей серии со стороны пленок

Импеданс многослойных пленочных образцов измерялся в линии «микрострейп», амплитуда тока возбуждения составляла 10 мА для всех измерений в диапазоне частот от 1 до 400 МГц. Внешнее квазистатическое магнитное поле H напряженностью от +100 Э до –100 Э создавалось катушками Гельмгольца и прикладывалось вдоль длинной стороны пленочных образцов (продольный магнитный импеданс). Все измерения проводились при комнатной температуре.

Магнитоимпедансный эффект характеризуется модулем полного сопротивления Z и его действительной частью R , а также МИ отношения полного сопротивления и его действительной части рассчитанные соответственно по формулам: $\Delta Z/Z = 100 \times (Z(H) - Z(H_{\max})) / Z(H_{\max})$, $\Delta R/R = 100 \times (R(H) - R(H_{\max})) / R(H_{\max})$, $H_{\max} = 100$ Э. Максимальные величины

$\Delta Z/Z$ и $\Delta R/R$ обозначались как $\Delta Z/Z_{\max}$ и $\Delta R/R_{\max}$. На рис. 3, б представлен стандартный вид МИ кривой с двумя пиками вблизи поля анизотропии. Наиболее чувствительные участки для детектирования малых магнитных полей (рабочий интервал) расположены в области полей от 0,5 до 7,0 Э.

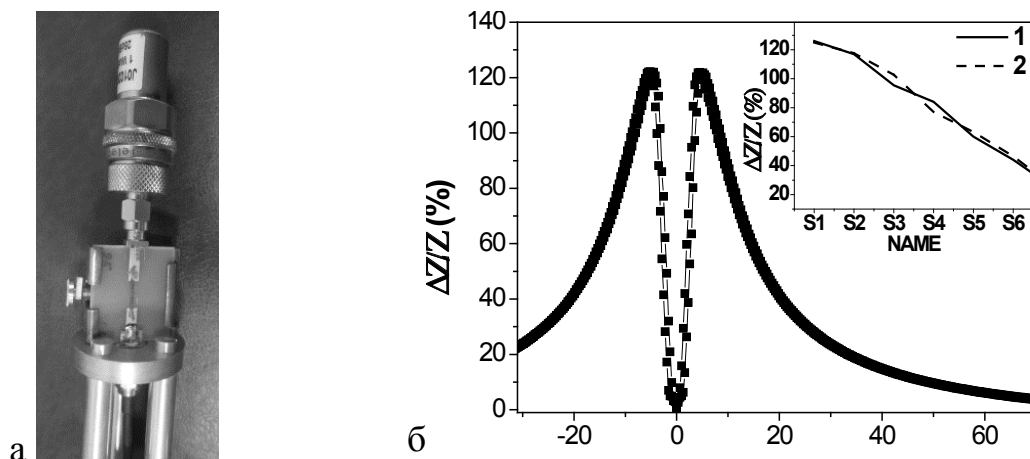


Рис. 3. (а) Положение пленочного образца на держателе для измерений МИ характеристик; (б) Полевая зависимость МИ соотношения полного импеданса для образца S2; на вставке показаны значения $\Delta Z/Z_{\max}$ в зависимости от типа структуры, полученные для 2 независимых измерений

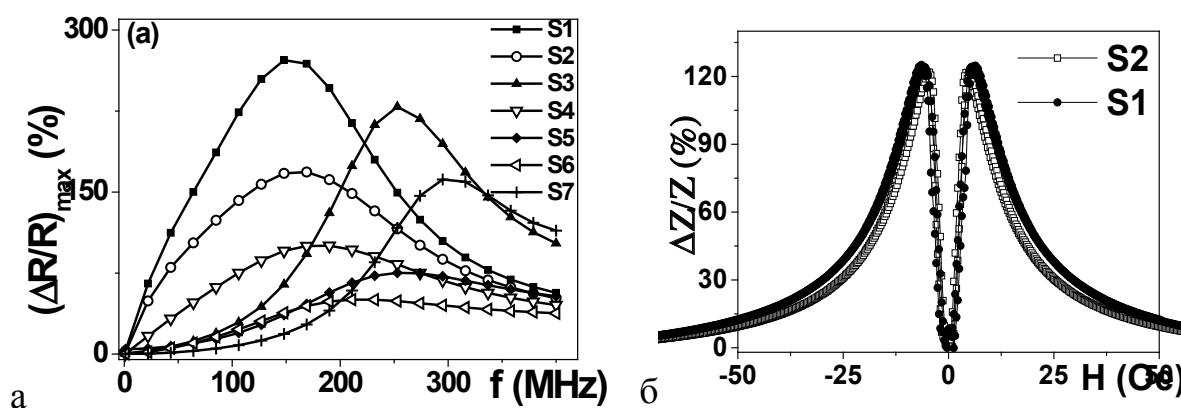


Рис. 4. (а) Частотная зависимость всех пленочных структур серии $[\text{Ti}/\text{FeNi}]_5/\text{Ti}/\text{Cu}/\text{Ti}/([\text{FeNi}]/\text{Ti})_x$; (б) Полевая зависимость образцов S1 и S2

На вставке рис. 3, б представлен график зависимости величины МИ отношения от числа слоев для всей серии асимметричных пленок $[\text{Ti}/\text{FeNi}]_5/\text{Ti}/\text{Cu}/\text{Ti}/([\text{FeNi}]/\text{Ti})_x$ ($x = 0$ to 5). Наблюдается монотонно-убывающая зависимость величины МИ отношения при уменьшении числа магнитных слоев над центральным проводящим слоем меди. Следует отметить, что для несколько других структур ранее обсуждалась зависимость МИ эффекта от

такого параметра как четное или нечетное количество магнитных слоев [5]. Обратим, однако, внимание на частотные зависимости. Несмотря на то, что абсолютный максимум МИ соотношения полного импеданса составляет $\Delta Z/Z=126\%$ и его действительной части $\Delta R/R=270\%$ наблюдался для структуры S1, структура S2 также обладает высоким МИ соотношением $\Delta Z/Z=121\%$ и $\Delta R/R=160\%$ в меньших полях, но на больших частотах и, как показано на рис. 4, б.

Близость МИ характеристик пленочных структур типа S1 и S2 позволяет рекомендовать асимметричную структуру для последующей функционализации верхнего слоя, например, с помощью углеродного покрытия [6], с перспективой использования для магнитного биодетектирования с помощью магнитных маркеров или с использованием феррогелей.

Список литературы

1. Makhotkin V. E., Shurukhin B. P., Lopatin V. A., Marchukov P. Yu., Levin Yu. K. Magnetic field sensors based on amorphous ribbons // *Sensors and Actuators A*. – 1991. – V.27. – P.759–762.
2. Курляндская Г. В., де Кос Д., Волчков С. О. Магниточувствительные преобразователи для неразрушающего контроля, работающие на основе гигантского магнитоимпедансного эффекта (Обзор) // *Дефектоскопия*. – 2009. № 6. – С. 13–42.
3. Антонов А. С., Гадецкий С. Н., Грановский А. В., Дьячков А. Л., Парамонов В. П., Перов Н. С., Прокошин А. Ф., Усов Н. А., Лагарьков А. Н. Гигантский магнитоимпеданс в аморфных нанокристаллических мультислоях // *ФММ*. – 1997. – Т. 83, № 6. – С. 61–71.
4. Kurlyandskaya G. V. Giant magnetoimpedance for biosensing: Advantages and shortcomings // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2009. – V. 321 I.7. – P. 659–662.
5. Nanostructured magnetoimpedance multilayers with different thickness of FeNi components / A. A. Chlenova, G. V. Kurlyandskaya, S. O. Volchikov, V.N. Lepalovskij, Rhimou El Kammouni // *Sol. State Phen.* – 2014. – V. 21. – P. 342–346.
6. Safronov A. P., Kurlyandskaya G. V., Chlenova A. A., Kuznetsov M. V., Bazhin D. N., Beketov I. V., Sanchez-Ilduya M. B., Martinez-Amesti A. Carbon deposition from aromatic solvents onto active intact 3d metal surface at ambient conditions // *Langmuir*. – 2014. – V. 30 №11. – P. 3243–3253.